



Determinismo en la física clásica: Laplace vs. Popper o Prigogine

Martín López Corredoira
La Laguna



pretende mostrarse en este artículo que la física clásica¹ no deja lugar para el indeterminismo, tal como Laplace proclamó hace casi dos siglos. No se discute aquí la validez de la física clásica; el objetivo es mostrar que ésta es un modelo del mundo determinista, y si el mundo responde a este modelo o no es otro tema. Algunos autores, como Popper o Prigogine, han intentado rebatir este determinismo en la física clásica en base a argumentos tales como la existencia de sistemas con bifurcaciones, la flecha del tiempo, el caos, &c. Muchos filósofos postmodernos también han elegido el tema del caos para defender ciertas ideas tan confusas como erróneas («en río revuelto ganancia de pescadores»). Sin embargo, aquí se mostrará que todo lo que están haciendo estos autores es básicamente confundir de manera inapropiada el determinismo con la predictibilidad, y que Laplace estaba más en lo cierto que sus detractores.

I. Determinismo de Laplace

La física clásica describe una realidad independiente del observador, una realidad fuera de nosotros, en el espacio. El sujeto es un espectador, el acontecer físico está al margen del espectador. La imagen del sistema del mundo plasmada en el tercer libro de los *Principia* (Newton 1687) era la imagen sólida y exacta de una máquina, regulada por leyes matemáticas inmutables, de ahí que se designase como «Universo máquina» tal cosmovisión (Casini 1969).

El determinismo suele estar asociado al mecanicismo aunque no siempre son equivalentes; por ejemplo, en la mecánica

cuántica no lo es. En el caso de la mecánica clásica sí hay tal identidad. Los mecanismos se rigen por leyes causales exactas, y por tanto sujetas a una necesidad o determinismo.

A pesar de que hay muchos tratados filosóficos acerca de la cuestión del determinismo, pienso que la mejor explicación del término viene dada por su descripción en términos físicos derivada de la física clásica. Es lo que se suele conocer como determinismo de Laplace, porque fue este científico quien lo subrayó de entre las consecuencias derivadas de la mecánica de Newton. De hecho, muchas de las doctrinas calificadas de deterministas son una extensión del modo como se ha entendido la estructura de la mecánica clásica.

Todo sistema físico, para Newton, se podía reducir a un conjunto de N partículas puntuales en el espacio y sus interacciones. Vemos pues, una expresión de reduccionismo anterior a que se hiciese uso común del término. Cada una de las partículas i posee una determinada masa, m_i , y una posición en el espacio tridimensional que varía continuamente para cada instante de tiempo, $r_i(t)$. Otras características cinemáticas de la partícula, como la velocidad o la aceleración, no son sino la derivada primera y segunda con respecto al tiempo del vector-función $r_i(t)$. También, posteriormente a la época de Newton, se introdujo dentro del marco de la mecánica clásica la carga eléctrica de la partícula como otro número asociado a cada partícula, y asimismo otras cantidades características de las partículas, aunque éstas se suelen englobar en el conocimiento derivado de la mecánica cuántica y no la clásica.

En un sistema de N partículas cerrado², las trayectorias $r_i(t)$ siguen la leyes de Newton que se describen, expresadas de modo matemático, como:

(1) Se denomina física clásica a aquella que no posee elementos de física cuántica. Se incluye también la teoría de la relatividad como física clásica.

(2) No hay interacción ni intercambio de partículas con el resto del Universo fuera del sistema en cuestión. Ante la duda de si es posible concebir un sistema

$$m_i \ddot{r}_i(t) = F_i(r_j, \dot{r}_j \forall j \neq i; t) \forall i, \forall t \quad (1)$$

donde \dot{r} y \ddot{r} simbolizan las derivadas primera y segunda respectivamente con respecto al tiempo del vector-función r ; y F son los vectores-fuerza función de la posición y velocidad de las otras partículas $j \neq i$ con respecto a la partícula i , y el tiempo t . Las funciones F_i son relaciones numéricas exactas, de modo que dadas las posiciones de las partículas y sus derivadas, las velocidades, los valores de las tres componentes de la fuerza F_i que afecta a cada partícula estarán determinados para cada instante de tiempo.

Hay $3N$ ecuaciones diferenciales de segundo orden, pues es una ecuación vectorial para cada partícula, lo que suponen tres ecuaciones escalares cada una dado que los vectores pertenecen a un espacio de tres dimensiones. Un sistema como éste tiene solución única ($\Rightarrow \exists^n r_i(t) \forall t$) si: 1) se conocen $6N$ condiciones iniciales, concretamente los seis números dados por la posición y la velocidad (\dot{r}_i) para cada partícula, en un instante dado t_0 ; 2) las posiciones r_i son derivables dos veces. La segunda condición se cumple siempre y cuando se puedan encontrar las fuerzas entre partículas, y esto se cumple siempre que no aparezcan divergencias —o sea, valores infinitos— en el modulo de la fuerza.

Si la interacción entre partículas fuese gravitatoria, por ejemplo, aparecerían divergencias cuando dos partículas ocupasen exactamente la misma posición; al ser su distancia nula y la fuerza entre ambas inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, ocasionaría una interacción de amplitud infinita. Sin embargo, debido a la existencia de fuerzas repulsivas, tales como la repulsión de las cortezas atómicas constituidas por electrones entre distintos átomos, no tienen lugar los colapsos de infinita aproximación de partículas entre sí. De hecho, no se observan objetos colapsados³.

En conclusión, uno debe inferir que dadas las posiciones y las velocidades de todas las partículas de un sistema cerrado en un instante de tiempo, quedan determinadas sus posiciones —y por ende su velocidad, aceleración,... derivando con respecto al tiempo aquella— para todo instante pasado o futuro. También se puede determinar todo el sistema $\forall t$ dando cualesquiera otras $6N$ condiciones independientes —no ligadas por las ecuaciones diferenciales— aunque no correspondan a un mismo tiempo. A raíz de lo hasta aquí expuesto, cabe deducir que las leyes de Newton para el movimiento implican que la conducta futura de un sistema de cuerpos está determinada completamente con saber las posiciones y velocidades en un solo instante de tiempo. Ello estaba implícito en la formulación original de Newton pero fue Laplace quien, más de un siglo después, llamase la atención del determinismo presente en la física clásica. Además, Laplace extiende las discusiones hacia otros terrenos que han venido preocupando a muchos pensadores por el origen de nuestro querer, sentir, pensar, actuar,...

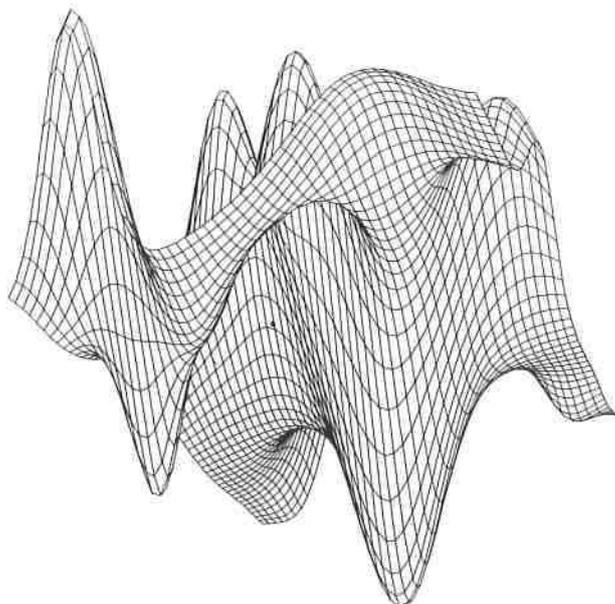
totalmente cerrado, podríamos agarrarnos a la certeza de que existe al menos uno: el Universo entero, dado que éste, por definición, no puede intercambiar nada con otra cosa que no sea él mismo pues no existe más que el Universo mismo.

(3) La teoría de la relatividad general habla de la posible existencia de unos objetos colapsados gravitatoriamente llamados «agujeros negros», pero la corroboración empírica de su existencia todavía es un tema pendiente. Además, las condiciones de la materia en instantes próximos al colapso deberían ser explicadas por una teoría más amplia que la mecánica clásica: una gravedad cuántica, la cual se haya actualmente sin desarrollar. En cualquier caso, éstos son temas que se alejan del propósito de descripción de la mecánica que parte de las ideas de Newton.

Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la Naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos. (Laplace 1814, *De la probabilidad*)

Palabras con intenciones parecidas a las de Laplace tienen precedentes, o expresiones similares, entre diversos autores que consideraron el sometimiento de todos los fenómenos existentes a la necesidad:

Aunque podamos imaginarnos que nos sentimos en libertad, un espectador puede comúnmente deducir nuestros actos de nuestros motivos y de nuestro carácter; aún si no lo puede, deduce de manera general que él podría llegar a conocer perfectamente todas las circunstancias de nuestra situación y de nuestro carácter, y los más secretos resortes de nuestra constitución y de nuestras disposiciones. Ahora bien, ésta es la esencia de la necesidad. (Hume 1748, ed. 1975, pág. 103) Se puede, pues, admitir que si para nosotros fuere posible tener en el modo de pensar de un hombre, tal y como se muestra por actos interiores y exteriores, una visión tan profunda que todo motor, aun el más insignificante, nos fuera conocido, y del mismo modo todas las circunstancias exteriores que operen sobre él, se podría calcular con seguridad la conducta de un hombre en lo porvenir, como los eclipses de sol o de la luna, y, sin embargo, sostener que el hombre es libre. (Kant 1788, ed. española 1994, pág. 125)⁴ En planes y empresas propios tenemos en cuenta el efecto de los motivos sobre los hombres con una seguridad que vendría a ser del todo igual a aquella con la que se calculan los efectos mecánicos de los dispositivos mecánicos, siempre y cuando conociésemos los caracteres individuales de los hombres a tratar aquí con la misma exactitud con que allí se conoce el largo y grosor de la viga, los diámetros de las ruedas, el peso de las cargas, &c. (Schopenhauer 1841, ed. española 1993, pág. 72)



(4) La libertad atribuida de la que habla Kant es de tipo moral y la concibe en otro mundo fuera de los fenómenos, fuera del alcance de la física por tanto. Ha de negar pues la compatibilidad del determinismo de la mecánica clásica y la libertad concluyendo un dualismo.

Quizás el elemento más original de que dispone el pensamiento de Laplace a este respecto es el concepto de un determinismo sólidamente edificado en la física de Newton, siendo el resto de los elementos una continuación de la tradición filosófica que considera una necesidad omnipresente. Las ideas de un mundo determinista de Hobbes precedieron a la teoría de Newton. El éxito que luego tuvo la visión newtoniana se interpretó como una corroboración de la doctrina determinista. Newton y sus seguidores habían convertido el antiguo programa determinista en una realidad. La unión del atomismo materialista de Demócrito o de Leucipo (en el que todo el Universo era reducido al movimiento de los átomos por el espacio y de que nada ocurre sin una causa siendo todo necesario) con las leyes de Newton, hace a Laplace concebir un comportamiento de la materia compuesta de partículas semejante al de los planetas. La única diferencia es la mayor complejidad de aquélla con respecto a los sistemas planetarios, pues el número de átomos en cualquier sistema físico es enorme, mucho mayor que el número de planetas del sistema solar. Conociendo Laplace el movimiento mecánico de los planetas⁵, no dudó en asignarle una categoría semejante a cualquier tipo de sistema físico, a todo lo existente incluyendo los seres humanos.

Ciertas críticas provienen de la idea de que un pensamiento determinado no posee valor. Fue Epicuro quien dijo que un determinista no puede criticar la doctrina del libre albedrío porque admite que su crítica está determinada (Wiggins 1970); afirmar que todo está determinado equivale a afirmar que la afirmación está asimismo determinada y, por lo tanto, quitarle todo valor de afirmación. Y, como Epicuro, muchos otros autores fundamentaron su crítica en esto mismo: Lequier, Bohm (1981, cap. 3), &c. Me parece una crítica sin fundamento. ¿Por qué ha de perder valor un razonamiento al que se está destinado a llegar? ¿Acaso tienen más valor los razonamientos indeterminados? ¿Por qué? Ante la falta de respuestas a estas preguntas, ante una falta de fundamento en la crítica, no cabe considerarla como tal. No supone ninguna contradicción estar determinados y, arrastrados por el destino, darse cuenta de que estamos determinados. Es totalmente consistente. Uno no puede «elegir» las buenas ideas, pero el destino puede «elegir» a los individuos que han de tener la verdad en sus manos. Unos pocos «elegidos por el destino» tienen la razón y los demás se equivocan. En analogía a la doctrina de Calvino (Harkness 1931), podríamos decir que el camino de nuestra vida consiste en saber si nosotros estamos entre los elegidos, pero no podemos hacer nada para

(5) Precisamente fue Laplace quien resolvió las ecuaciones que explicaban los movimientos del sistema solar por completo y su estabilidad en base a leyes físicas y sin ningún elemento extraño a éstas. Newton había observado anomalías en los movimientos de Saturno y Júpiter, de las que su sistema no podía dar cuenta, y esto le había llevado a pensar en la necesidad de una Mano Poderosa que debía intervenir para volver a colocar en su sitio los cuerpos que se habían desviado. Laplace logró demostrar, ya en 1773, que los movimientos y las distancias medias entre los planetas son invariables o están sometidas a pequeñas variaciones periódicas. Posteriormente, entre 1784 y 1787, logró demostrar que no eran más que perturbaciones periódicas que dependían de la ley de atracción. Esto le permitió concluir que el sistema era estable y Dios una hipótesis inútil. Es bien conocida la anécdota (Bell 1961; Harre 1972) de que Laplace, una vez resueltas esas ecuaciones, presentó a Napoleón su trabajo. Ante la pregunta del papel que se le reservaba a Dios en la ordenación de tales movimientos, contestó orgulloso que Dios era completamente innecesario. Dios es innecesario para la mecánica del mundo, y el alma o mente es innecesaria para la mecánica de los cuerpos humanos; todo sistema físico se rige por sí solo sin necesidad de espíritus que intercedan. Tal es la feliz idea del materialismo, que tuvo en la Francia de los tiempos de Laplace un auge espléndido.

cambiarnos de bando. Suponiendo que el mundo obedece a un determinismo, unos pocos elegidos verían la verdad: que el mundo es determinista, y los demás estarían condenados a las tinieblas de la ignorancia.

El ideal de Laplace aplicado al ser humano no es para algunos más que una atrevida extrapolación. Los autores que se han opuesto al determinismo desde el punto de vista ético y antropológico-filosófico han subrayado que dentro de una doctrina determinista no cabría el libre albedrío. El humano existir, según estos pensadores, no es comparable a ninguna de las cosas naturales y, por lo tanto, no pueden aplicarse al mismo las categorías aplicables a tales cosas. Este tipo de críticas antirreduccionistas son prejuicios sin fundamento, no tienen base de crítica.

La única crítica a considerar es la negación del determinismo en el hombre: o bien porque es falso el reduccionismo del hombre a un sistema físico, o bien porque las leyes de Newton no son deterministas u otras leyes deben sustituirlas. Es precisamente el indeterminismo de la mecánica clásica lo que estamos analizando en este artículo, descartándolo. Los prejuicios antirreduccionistas, si se refieren a la ontología, no son más que meras opiniones al margen de la ciencia. La única defensa coherente de un indeterminismo residiría en la mecánica cuántica.

El prestigio que alcanzó la visión determinista fue en aumento en el curso del siglo XIX cuando áreas de la física que parecían no cuadrar con la concepción determinista (termodinámica, óptica, electromagnetismo) fueron finalmente reducidas a los esquemas de las ecuaciones newtonianas (Fernández Rañada 1982). Ello hizo que el determinismo de Laplace tuviera una repercusión importante en todo el pensamiento científico y fuese punto de partida, a compartir o criticar, de todo aquel que quisiese hablar de determinismo en las ciencias.

Aunque no entro a considerar en detalle la teoría de la relatividad de Einstein, tanto la especial como la general, cabe decir que no añade nada nuevo frente a la física de Newton en lo que al determinismo se refiere. La misma rigidez mecánica de las leyes exactas aparece en su formulación.

II. Predictibilidad, computabilidad

En las discusiones en torno al determinismo se suelen mezclar otros conceptos bien distintos de aquél, como son la predictibilidad o computabilidad.

«Predictibilidad» o «computabilidad» significa que nosotros, seres humanos, podemos predecir el estado futuro de un sistema físico, podemos calcular los valores de todas sus variables. Es un término que nos habla por tanto de lo que podemos conocer, epistemología, algo diferente a la referencia ontológica del determinismo. Debe quedar claro que «determinismo» es un concepto más amplio que «predictibilidad» o «computabilidad». Determinismo no implica predictibilidad. Ante todo, hemos de tener claro que un sistema determinista no tiene por qué ser conocible. Puede haber un destino que determine un suceso, pero que el conocimiento de ese destino sea inaccesible, o sea, que no sea predecible. Lo que sí es cierto es que predictibilidad

implica determinismo, es decir, si queremos predecir exactamente el comportamiento de un sistema éste ha de estar gobernado por leyes deterministas exactas y nosotros hemos de conocer esas leyes y todos los parámetros que a ellas conciernen. Ésta fue una de las ideas más importantes en la modernidad: que existen unas leyes y que, gracias a la ciencia, las podemos conocer.

Aplicado a la mecánica clásica, podríamos predecir el comportamiento de un sistema cerrado si conociésemos los valores de las posiciones y velocidades de todas sus partículas en un determinado instante de tiempo y pudiésemos resolver el sistema de ecuaciones (1). El hecho de que el sistema esté determinado no implica que nosotros conozcamos su determinación. Cuando Laplace decía «una inteligencia que conociera...» no se estaba refiriendo a los seres humanos, pues nuestro conocimiento siempre estará limitado como seres finitos que somos. Él se refería al determinismo, y esa mención de la superinteligencia omnipredictrora sería un modo de expresión para referirse a que la predictibilidad en un Universo determinista es teóricamente posible pero vedada a todos los seres que no sean infinitos. De hecho, él afirma que la posibilidad de alcanzar la certeza absoluta está completamente cerrada para el hombre y que a lo más que puede aspirar es a obtener un conocimiento meramente probable. En ningún caso, según interpreto en sus lecturas, hay que entender la afirmación de Laplace como la afirmación de nuestra capacidad predictiva sin límites. Bien conocía él que el número de átomos en unos pocos gramos de materia es del orden del número de Avogadro ($N_A = 6.2 \cdot 10^{23}$), y que el conocimiento de las posiciones y velocidades de tales sobrepasa en mucho cualquier esfuerzo humano. Es así que el párrafo sobre la superinteligencia continua diciendo respecto a los seres humanos:

Todos sus esfuerzos por buscar la verdad tienden a aproximarlo continuamente a la inteligencia que acabamos de imaginar, pero de la que siempre permanecerá infinitamente alejado. (Laplace 1814, *De la probabilidad*)

En relación al tema de la libertad, diversos autores constatan que existe una contradicción entre la predictibilidad —que implica determinismo y niega la libertad— y la aparente opción abierta de poder cambiar los hechos predichos cuando está en nuestra mano hacerlo. Si un hombre está determinado y puede conocer sus acciones futuras —dicen— entonces las podrá cambiar, podrá decidir el contradecir a su destino y entonces hay una contradicción con el destino fijado previamente (MacKay 1967). Por ejemplo, Penrose expresa:

Me parece que si uno tiene determinismo fuerte, pero sin muchos mundos, entonces el esquema matemático que gobierna la estructura del Universo tendría probablemente que ser no algorítmico. Por otra parte, se podría en principio calcular lo que se va a hacer y se podría decidir hacer algo diferente, lo que sería una contradicción entre el libre albedrío y el determinismo fuerte de la teoría. Introduciendo no computabilidad en la teoría se puede evitar esta contradicción. (Penrose 1989, vers. inglesa ed. Vintage, pág. 560)

Así es. Se puede estar determinado y ello no implica conocer tal determinación. Y además, es necesario que se cumpla el destino conocido de la determinación, de lo contrario no falla la determinación sino nuestro conocimiento de él. Gödel expresaba que puede haber una teoría determinista

que explique la conducta de un ser humano en base a su herencia genética y su entorno, pero la persona no la puede aprender para poder cambiar su destino, a menos que uno no quiera cambiar su destino y ese no querer cambiarlo esté también predestinado (Rucker 1983). En efecto, aunque el determinismo no tiene por qué llevar a contradicciones, la total predictibilidad por nosotros —si nosotros fuésemos esos demonios de Laplace, y pudiéramos cambiar el destino— sí sería contradictoria. Pero es que nosotros no somos demonios de Laplace y si lo fuésemos lo seríamos pasivamente para ver transcurrir cualquier acontecer sin que nada pudiéramos cambiar.

Caos

Con el desarrollo de la informática y su uso para resolver problemas físicos que requieren demasiados cálculos surgieron las cuestiones de computabilidad o no de casos particulares de sistemas físicos. Realmente, la idea de que no todo es predecible, incluso en un Universo determinista, ha sido conocida durante siglos, y comprendida en términos físico-matemáticos a finales del siglo XIX⁶, antes de que apareciesen los primeros ordenadores, pero fue la necesidad de aplicar los conocimientos en la práctica lo que le dio relevancia al tema. De aquí se derivaría aquello que se conoce como «caos» (Jensen 1990).

Existen en la literatura numerosas malas interpretaciones de lo que significa «caos», que apuntan interpretaciones filosóficas insostenibles⁷. Muchos autores han pretendido ver en esta área de la físico-matemática una revolución conceptual comparable a la relatividad o a la mecánica cuántica, lo cual es harto inapropiado. Probablemente, esta propaganda obedezca a razones económicas, por las que se pretende conseguir una financiación en ciertos departamentos que de otro modo no podrían subsistir. Independientemente de las razones que se tengan para abusar del concepto de «caos», lo cierto es que bajo esta palabra, que pudiera pensarse en relación con algún enigma de la naturaleza, no hay más que la expresión de un hecho bastante trivial y que no supone en absoluto el abandono de las convicciones de la física clásica, como explicaré a continuación.

La expresión «caos» se refiere a la dificultad que surge en la predicción de la conducta de sistemas físicos. Una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales pueden describir un sistema deterministamente, como es el caso de las ecuaciones de Newton (1), y sin embargo su resolución a tiempos muy alejados de las condiciones iniciales conocidas ser inalcanzable con nuestras herramientas matemáticas. Ello se debe a que no siempre es posible obtener una solución de las ecuaciones diferenciales por métodos de cálculo analítico exactos, con lo cual hay que recurrir a métodos numéricos aproximados auxiliados por ordenadores. Así, por ejemplo, la resolución de (1) para $N > 2$ en el caso de interacción gravitatoria

(6) Maxwell [Maxwell, ed. 1952; Niven (ed.), 1890] o Poincaré (1909) apuntan en sus trabajos a los efectos caóticos en algunos sistemas.

(7) Por ejemplo, el caso de muchos pensadores postmodernos: Lyotard (1979), Michel Serres (1992), Baudrillard (1992), Deleuze y Guattari (1991), Guattari (1992) o Escototado (1999). El físico Jean Bricmont (Bricmont 1996; Sokal y Bricmont 1997, cap. 6) explica por qué estos y otros autores se equivocan al pretender configurar con base a esta rama de la ciencia una fuente de inspiración de múltiples confusiones con gran difusión entre los libros de divulgación populares. Básicamente, la conclusión a que llega es que los autores citados no saben de qué están hablando y utilizan su confusión para derivar de ella filosofías dispares.

$$(F_i = \frac{Gm_i m_j (r_m - r_i)}{|r_i - r_j|^3})$$

no puede ser abordada analíticamente y debe hacerse numéricamente. Un ejemplo de método numérico sencillo de resolución de ecuaciones diferenciales consiste en generar $r_i(t)$ en un instante futuro t utilizando la aproximación del desarrollo de Taylor a segundo orden:

$$r_i(t + \Delta t) \approx r_i(t) + \dot{r}_i(t)\Delta t + 1/2 \ddot{r}_i(t)(\Delta t)^2 \quad (2)$$

que es tanto más exacto cuanto más pequeño es el valor absoluto de Δt . Dadas las condiciones iniciales de posición $r_i(t_0)$ y velocidad $\dot{r}_i(t_0)$ para cada partícula i , podemos calcular $\dot{r}_i(t_0)$ por medio de (1) y obtener $r_i(t_1)$ con $t_1 = t_0 + \Delta t$ y Δt muy pequeño. La velocidad se deriva de la variación de posición por intervalo temporal. Posteriormente obtenemos $r_i(t_2)$ con $t_2 = t_1 + \Delta t$ aplicando lo mismo que antes; y así vamos calculando la posición de la partícula para $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots$ hasta llegar a $t_m = t$ que es el instante de tiempo en que estamos interesados en conocer el estado del sistema. Esto se realiza para cada partícula i , con lo cual se puede calcular el estado global de todo el sistema para cualquier tiempo. Igual que se hace para tiempos futuros se podría hacer para tiempos pasados haciendo Δt negativo. Existen otros métodos de resolución numérica de este tipo de ecuaciones diferenciales pero, de cara a consideraciones filosóficas, todos poseen el mismo problema, así que la discusión de este ejemplo es suficiente y extrapolable a cualquier otro.

El problema que poseen los métodos numéricos es que son aproximaciones, es decir, difieren de la solución real, hay un error con respecto a la auténtica posición de la partícula, supuesto que las ecuaciones son una buena descripción ontológica del sistema. La expresión (2) es sólo una aproximación tanto mejor cuanto menor sea el valor absoluto del intervalo Δt . Esto quiere decir que el cálculo de $r_i(t_1)$ será más exacto que el cálculo de $r_i(t_2)$, y a la vez éste más exacto que el cálculo de $r_i(t_3)$, &c. Cuanto más nos alejamos del instante t_0 , más inexacta será la solución. Teóricamente podríamos alcanzar una precisión infinita para cualquier t haciendo el límite Δt tendiendo a cero, pero ello implicaría $m = \infty$, o sea, habría infinitos tiempos intermedios en los que realizar el cálculo, y como el tiempo de cualquier cálculo de una máquina es finito nos llevaría infinito tiempo hacer un cálculo exacto. Debemos pues asumir que todo cálculo numérico posible en la práctica es sólo una aproximación. Además, hay que añadir el propio error de las medidas de las condiciones iniciales de las partículas, que son realizadas con un aparato de observación con precisión finita, y el propio redondeo de las cifras en el ordenador, pues un número real —con infinitas cifras decimales— es aproximado por el ordenador, dado su capacidad finita de almacenamiento y cálculo, como un número racional —con finitas cifras decimales correspondiente al truncado de dígitos del número real exacto.

A pesar de todo esto, los cálculos con ordenador pueden ser suficientemente precisos dentro de los límites que se necesitan. En la práctica, es suficiente con calcular el valor de las variables —por ejemplo, la posición de un planeta— aunque sea con algún pequeño error. En el ejemplo, un error de unos pocos metros en la posición de un planeta es inapreciable y por tanto suficientemente válido para fines prácticos.

Aunque también puede ser que no sean tan precisos sino más bien lo contrario. Lo sistemas que se denominan caóticos son aquellos que propagan los errores —bien sean de las condiciones iniciales, errores de redondeo o primeras iteraciones de (2)— muy rápidamente; tan rápidamente que unas pocas iteraciones son suficientes para que el error sea ya altísimo y nada despreciable a efectos prácticos. Pueden crecer exponencialmente y producirse divergencias entre posibles soluciones a tiempos muy cortos. El cómo de corto debe ser el tiempo $(t - t_0)$ hasta donde podemos realizar cálculos con una precisión aceptable depende de Δt . Cuanto menor sea Δt más lejos podremos llegar en la predictibilidad con un error acotado dentro de unos márgenes. También tendríamos «caos» cuando la solución de las ecuaciones diferenciales es extremadamente sensible a las condiciones iniciales. Dado que medimos las condiciones iniciales de un sistema con una precisión limitada, la impredecibilidad sería evidente en tal caso.

Cualquier sistema caótico determinista, como el surgido del problema de muchos cuerpos en interacción gravitatoria con las leyes de Newton, es predecible hasta un tiempo limitado por la capacidad de cálculo de los ordenadores. Esto hace que no se pueda predecir con los ordenadores actuales, realizando cálculos durante tiempos no demasiado largos, el clima en un plazo mayor de una semana, o que no se puedan conocer las posiciones de los planetas del sistema solar dentro de unos millones de años, por poner algunos ejemplos de sistema caóticos.

III. De los que confunden determinismo con predictibilidad

Una vez argumentada la diferencia entre determinismo y predictibilidad, es bien fácil poner en evidencia las ridículas defensas de un indeterminismo compatible con la mecánica clásica que realizan algunos autores como Popper o Prigogine.

El concepto «determinismo» pertenece, como dije anteriormente, a cómo son las cosas en sí, ontológicamente, y el de «predictibilidad» a cómo son las cosas en nuestro conocimiento, epistemológicamente. El determinismo depende del comportamiento de la naturaleza, independientemente de sus observadores, mientras que la predictibilidad depende en parte de la naturaleza y en parte de nosotros, de lo que somos capaces de observar, analizar o calcular. No deben confundirse pues. Y no debe olvidarse también que el objetivo último de la ciencia no es sólo predecir, sino también comprender, es decir, representarse los mecanismos de la naturaleza. La ciencia debe escudriñar cómo se mueve la naturaleza, independientemente de si se pueden predecir sus movimientos o no.

Laplace no se refiere a la predictibilidad sino que habla de un determinismo ontológico. El demonio de Laplace es un ser de capacidad infinita y puede, por tanto, conocer con toda la precisión que quiera la posición y la velocidad de las partículas; puede también hacer Δt tan pequeño como quiera en la ecuación (2) y predecir con la precisión que desee. Predecir con precisión infinita es equivalente a determinar y de ahí que Laplace se refiera con su predictibilidad

infinita al determinismo. Sin embargo, los seres humanos, lejos de ser dioses o demonios todopoderosos, tenemos una capacidad finita, nuestra potencia de cálculo y la sensibilidad de los aparatos de medida en nuestros experimentos y observaciones dependen de la capacidad tecnológica, la cual crece de día en día pero permanece siempre limitada, no puede ser infinita. Laplace toma una posición bien clara y sin lugar a controversias: el mundo descrito por la mecánica de Newton es determinista; las ecuaciones diferenciales (1) tienen solución única una vez fijadas las condiciones iniciales o de contorno y esto implica determinismo.

Uno debe posicionarse en cuanto al tema de lo que va a hablar antes de hacerlo. Laplace lo hace claramente en mi opinión. Sin embargo, Popper o Prigogine distan bastante de dar un mensaje claro.

1. El indeterminismo en Popper

Popper (1956) proclama un indeterminismo en la física clásica. Dice así en el prefacio a la edición de 1982 de *«El Universo abierto»*:

Mantengo que el determinismo laplaciano es insostenible y, además, que no lo requieren ni la física clásica ni la contemporánea. Este es un cometido serio, que no tiene nada que ver con subterfugios verbales. Mi argumentación, pues, será más en un plano cosmológico: hablaré del carácter de nuestro mundo en vez de hablar del significado de las palabras. (Popper 1956, Prefacio de 1982)

Hablar de ontología en vez de hablar del significado de las palabras, tal como propone Popper, me parece un camino correcto a seguir. Sin embargo, observo que Popper no hace lo que dice o se propone en un principio: no investiga los aspectos ontológicos de la realidad sino que se interesa más por los aspectos epistemológicos, y su intento de eludir la discusión acerca del significado de las palabras lo lleva a cabo escogiendo definiciones de «determinismo» arbitrarias que se salen del contenido ontológico. Tras su afirmación del propósito de no querer hablar del significado de las palabras, define el «determinismo científico» como sinónimo de la «predictibilidad». Es defendible lo que propone, pero es, como vengo señalando a lo largo de este capítulo, una cuestión bien alejada del análisis de lo que son las cosas y que se interesa por los límites de nuestra capacidad de cálculo. Su «determinismo científico» es algo de interés científico pero no es un determinismo, no es el determinismo laplaciano al menos. Es posible definir conceptos diversos bajo el término determinismo, pero entonces estaremos hablando del significado de las palabras y no del determinismo del que han estado hablando los científicos y filósofos desde los tiempos de Laplace e incluso antes.

Bajo el agravante de esta confusión, alude a su convencimiento del indeterminismo con argumentos tan someros como:

Entre las razones de mi convicción destaca el argumento intuitivo de que la creación de una obra nueva, tal como Sinfonía en sol menor de Mozart, no puede predecirse en todos los detalles por un físico o un fisiólogo. (Popper 1956, cap. 3)

Lo insatisfactorio, bajo mi punto de vista, de la defensa del indeterminismo de Popper es que hable de la predictibilidad haciendo creer que tal es el determinismo a que se han referido la mayoría de los científicos y filósofos, y por el que

tiene sentido preocuparse. El mismo uso insistente de la palabra «determinismo» en vez de «predictibilidad» juega a favor de una confusión.

Define también «determinismo *prima facie*», como aquel en que la descripción matemática del modelo físico nos permite hacer predicciones con un grado finito de precisión, lo cual afirma que se cumple en las teorías de Newton y Maxwell y no en Einstein. Nuevamente mezcla ideas de predictibilidad, en este caso con precisión finita y por tanto accesible a los seres humanos, con determinismo y con causalidad. Popper da a la relatividad especial de Einstein una categoría especial en tanto que encuentra en ella una asimetría de las cadenas causales físicas, que van del pasado al futuro y no del futuro al pasado, y por tanto podemos predecir en una sola dirección; el futuro está abierto y el pasado está cerrado. Esta impredictibilidad aparece, según Popper, porque la limitación de la velocidad de la luz impide la llegada de información de sucesos de algunas regiones alejadas. Esto son hechos elementales y bien conocidos que descentran el asunto principal y siguen sin decir nada acerca del determinismo de Laplace ni de la necesidad. El universo de Einstein es determinista, como el mismo Einstein reconocía, al igual que el universo de Newton.

Hay que agradecer a Popper que no fuese su intención el jugar con las palabras, tal como declaraba en el prólogo, porque si llegase a tener esta intención definiría una docena de definiciones más de determinismo a su conveniencia y seguiría jugando con lo que está contenido en sus definiciones. De los cuatro capítulos de un libro dedicado a demostrar el indeterminismo de la física clásica dedica tres a la predictibilidad bajo otro nombre. El cuarto, una vez se cree ya con la baza del indeterminismo en la mano, habla del determinismo metafísico, el ontológico, el que pertenece a la naturaleza de por sí y nada tiene que ver con la epistemológica predictibilidad. Sus argumentos para el rechazo de este determinismo-determinismo son mucho más pueriles, y realiza un tratamiento de esta cuestión de un modo un tanto secundario en comparación con otros apartados de su obra. Se basan en argumentos de «la flecha del tiempo» (que comentaré en la sección 5) o en la semejanza del determinismo con la doctrina de Parménides cuya cosmovisión, consistente en un mundo que no cambia y es siempre el mismo, critica. Popper cree que el determinismo metafísico es una cuestión de creencias, lejos de la labor científica, y lleva su discusión a un terreno de creencias metafísicas de la antigua Grecia, demasiado lejos de la discusión de la física clásica, la cual se suponía el tema de su libro. Es obvio que el determinismo metafísico es una cuestión metafísica y que la ciencia está limitada a la hora de hablar de estos temas. Pero lo que es bien cierto es que la mecánica clásica describe un mundo con determinismo meta-físico; no se puede uno referir a la mecánica clásica sin incluir el determinismo laplaciano, son inseparables. El determinismo no es un añadido ideológico al conjunto de leyes de la física clásica. Ciertamente que las ideas falsacionistas de Popper pueden poner en duda la validez del determinismo metafísico, precisamente por ser una cuestión metafísica, pero sólo a condición de que se falsee la mecánica clásica. Uno no puede decir que la mecánica clásica es un modelo correcto del mundo y decir al mismo tiempo que no hay determinismo.

Popper, incorrectamente bajo mi punto de vista, defiende que la física clásica no requiere el determinismo laplaciano. Lo que defiende es falso. Se puede discutir acerca de la

realidad del determinismo, lo que él llama «determinismo metafísico», pero no se puede discutir si la física clásica supone una descripción determinista. Es, sin duda, determinista, y esto es tan exacto e indiscutible como que « $2+2=4$ ». Supone deshonestidad escribir un libro dedicado a refutar el indeterminismo en la mecánica clásica para referirse a asuntos de diversa índole y terminar diciendo que no cree en el determinismo porque no cree en la mecánica clásica.

No termino aquí la crítica al trabajo de Popper. Lo que sigue en este capítulo es también aplicable a sus erróneas enseñanzas.

2. El indeterminismo en Prigogine

Ya he mencionado a un autor que cree tener argumento suficiente para desmontar el determinismo laplaciano en la física clásica utilizando una confusión de términos: Karl Popper. Pero, por supuesto, no es el único pensador que comulga con la mezcla de términos. Ilya Prigogine es otro caso bien conocido junto con sus seguidores.

En Prigogine se observa también oscuridad en sus argumentos cuando habla de azar e indeterminismo. Quiero mostrar el tipo de respuestas que ofrece un defensor del indeterminismo clásico, Prigogine, ante la acusación de estar confundiendo expresiones. Por ejemplo, en una charla de un congreso (Wagensberg (ed.) 1986) en torno a los temas de azar, determinismo y libertad dice:

No me interesa nada la cuestión de si la naturaleza sabe o no lo que hace. Yo no hablo de lo que la naturaleza sabe o deja de saber. No hablo de ontología, sino de modelos intelectuales sobre el mundo en que vivimos. (Prigogine 1986)

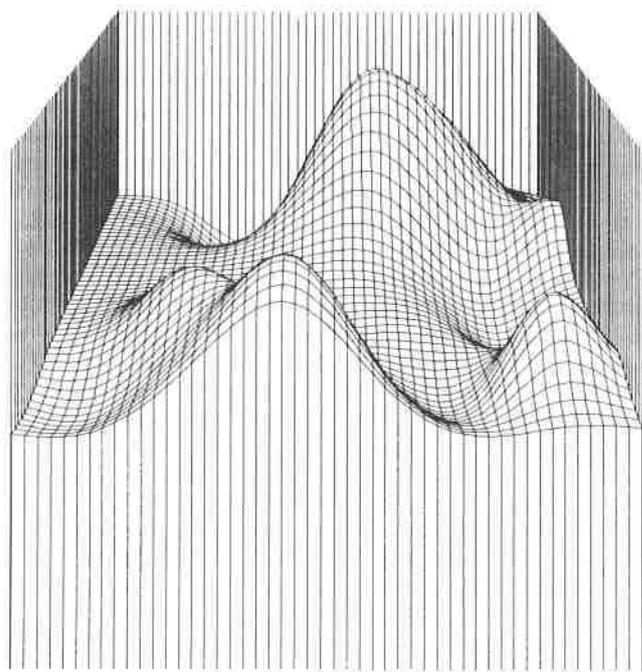
De estas palabras se puede decir que a Prigogine no le interesa el mundo como es sino que está más interesado en buscarse algún algoritmo matemático que sea compatible con los datos que obtiene en sus experimentos de laboratorio, una idea instrumental de la ciencia que repudia toda misión de comprensión del mundo por parte de ésta. En esta misma charla, René Thom preguntaba a Prigogine tras su exposición:

De todos modos, permítame una observación final sobre sus afirmaciones. Creo que debería usted distinguir muy cuidadosamente aquello que atañe a las matemáticas de aquello que pertenece al mundo real. Las matemáticas no tienen nada que ver con el mundo real⁸.

y Prigogine contestó:

Éste es su punto de vista, no el mío. (Prigogine 1986)

(8) Aquí hace René Thom una crítica al querer hacer de la física pura matemática y querer extraer conclusiones sobre la naturaleza en base a resultados matemáticos sin más interpretación. Esto ocurre en una buena parte de los asuntos que trata la física teórica actualmente en la mayor parte de los campos. En vez de utilizar las matemáticas para operar y tratar de pensar los conceptos independientemente de éstas, se tiende en muchos casos a coger un conjunto de ecuaciones y tratar de amoldar la naturaleza a los resultados de éstas; se olvida muchas veces que el significado de las cosas, la filosofía del problema, no puede ser solución del planteamiento de una ecuación porque la misma ecuación para ser planteada necesita asunciones previas. No podemos obviar el pensamiento con un cálculo. Como decía el premio nóbel de física Hannes Alfvén, las teorías matemáticas deben ser siervas del entendimiento físico derivado de las observaciones y experimentaciones, nunca las maestras.



De las dos contestaciones de Prigogine infiero que su interés está en los «modelos intelectuales» matemáticos que no son ontológicos pero sí tienen que ver con el mundo real. Ahora bien, si tienen que ver con el mundo real si pretenden ser ontológicos, ¿no?

Más contestaciones de Prigogine:

Es necesario distinguir entre determinismo y predictibilidad. Carlos Ulises Moulines (Wagensberg (ed.) 1986, *Segundo debate general: determinismo y libertad*)

Quiero decir, en primer lugar, que para mí, como físico, las teorías se refieren a la naturaleza, y no estoy seguro de que me interese una dirección semántica para el debate. Prigogine (Wagensberg (ed.) 1986, *Segundo debate general: determinismo y libertad*)

Esto confirma más su visión ontológica de las ciencias, por una parte, y su interés por confundir lo que es en sí con lo que podemos conocer de las cosas. Primero dice que no habla de la naturaleza sino de modelos intelectuales acerca del mundo y luego manifiesta que esos modelos, esas teorías, se refieren a la naturaleza. ¿Habla de la naturaleza o no? Si tenemos interés en la naturaleza, debemos fijarnos en su determinismo o indeterminismo. Si tenemos interés en nuestro conocimiento de las variables matemáticas de los modelos que representan a la naturaleza debemos fijarnos en su predictibilidad o impredictibilidad. De acuerdo que no deben usarse más términos de los precisos pero creo que he evidenciado suficientemente en la sección 2 la necesidad de distinguir entre los dos referidos.

Otro ejemplo de contestaciones:

Si sólo creemos en la viabilidad de formalismos estrictamente deterministas, entonces es verdad, la libertad sólo puede ser una ilusión. Pero basta tomar conciencia de que el cerebro es un sistema altamente inestable y caótico para que la cuestión adquiera inmediatamente otro cariz. Tradicionalmente había que escoger entre un punto de vista anticientífico y la alienante idea de que somos autómatas, aunque no lo sepamos. Pienso que la física moderna ha colaborado con el fin de tal

Vemos pues como, a base de echar arena a los ojos de sus lectores, logra defender una libertad y un indeterminismo que no se sabe lo que significan aparentando estar fundamentado en descubrimientos de la nueva ciencia cuando lo cierto es que el caos no desmiente el determinismo de la física clásica. Con ello llega a que no somos autómatas. ¿No somos?, ¿por qué habla de lo que son las cosas en el hombre si no le interesa para nada la ontología?, ¿quiere decir que no conocemos si somos?

Más confusa es su afirmación de que la ciencia no puede decirnos lo que «es» el hombre (Prigogine y Stengers 1988, cap. 8). Si la ciencia no puede decirnos lo que es el hombre, ¿por qué puede decirnos si es libre o no?, ¿tiene algo que decir la ciencia acerca del determinismo o no?, ¿y de la libertad? Por otra parte, contradiciéndose nuevamente, en una entrevista de un periódico (Prigogine (entrevista a:) 1996a) afirmaba que:

No somos nosotros los que creamos estos conceptos, sino la naturaleza la que los impone. ¡Me parece equivocado pensar que la ciencia no es más que una extrapolación del hombre!

Pienso que Prigogine juega con dos barajas y suelta cartas de una u otra según le convenga para sus respuestas. A eso es a lo que llama él la unificación de las dos culturas. Ante tal tipo de respuestas pienso que queda suficientemente ejemplificado que el autor no tiene las ideas claras y, por lo tanto, difícilmente puede fraguar una defensa coherente. Prigogine lleva al extremo sus confusiones y argumenta posiciones tan extremas como que «*la noción de caos nos lleva a repensar la noción de "leyes de la naturaleza"*» (Prigogine 1994, pág. 15), cuando ya hemos visto en la sección 2.1 que no hay nada contradictorio en el caos con la física de Newton. Analizaré, no obstante, algunos de los argumentos de Prigogine en las siguientes secciones.

IV. Argumento indeterminista en base a las bifurcaciones

El físico y matemático del s. XIX James Clerk Maxwell (Niven (ed.), 1890) buscó durante su vida salidas a la imposición determinista-mecanicista. Buscaba establecer posibles causalidades dependientes de la acción de la voluntad. Su intención era demostrar que era posible actuar libremente sin violar las leyes de la física. Para no violar leyes como la conservación de la energía, se veía en la obligación de demostrar que la voluntad podía operar sin ningún gasto de energía. En 1873, escribió un artículo titulado (traducido al español) «¿Tiende el progreso de las ciencias físicas a dar alguna ventaja a la opinión de la necesidad (o determinismo) frente a la de contingencia de los sucesos y el libre albedrío?». Trató de reinterpretar el atomismo, la termodinámica y la estadística para que, en vez de derivar en un determinismo, como supo Laplace, apoyase la posibilidad de libertad humana.

Un trabajo sobre mecánica de fluidos de Joseph Boussinesq mostró en 1878 que, bajo ciertas condiciones, las ecuaciones diferenciales que regulan un sistema mecánico tienen solu-

ciones múltiples en ciertos puntos de singularidad en las que determinadas fuerzas podrían producir movimientos que no están unívocamente determinados. Esto inspiró a Maxwell en la idea de que la voluntad libre del individuo actúe en singularidades como ésta para determinar cuál solución se deriva. Maxwell destacó la imperfección de la estadística y de la mayor parte del conocimiento en Física. Sin embargo, estos argumentos no convencieron demasiado, no se pudo abrazar el indeterminismo convincentemente porque las teorías sobre física estadística pudieron dar cuenta de todo lo macroscópico en función de leyes Newtonianas que afectan a las partículas microscópicas que constituyen el sistema, y mostrar que debajo de todo azar aparente hay un mecanismo rígidamente determinista. Sobre esto me extenderé en la sección 6.

La idea maxwelliana, marginada dentro de la ciencia del siglo XX, surge con algunos nuevos exponentes, como el mencionado Prigogine (Prigogine y Stengers 1979, 1984, 1988; Prigogine 1994, 1996b). Desde la termodinámica, hace alusiones al indeterminismo y el acercamiento de las dos culturas, humanística y científica, relacionados con el concepto de libertad. Declara que las ciencias modernamente desarrolladas acerca de la complejidad conllevan indeterminismo, independientemente de los nuevos descubrimientos de la mecánica cuántica (Nicolis y Prigogine 1987).

En la termodinámica lejos del equilibrio, pueden existir unas estructuras características denominadas *bifurcaciones*⁹. En las bifurcaciones, pequeñísimas fluctuaciones de alguna variable del sistema físico producen comportamientos futuros totalmente distintos. Ello hace a estos sistemas impredecibles. Cada vez que un sistema encuentra una bifurcación crítica y se reorganiza, se dice que hay una rotura de simetría y disipación¹⁰.

En este tipo de sistemas con bifurcaciones, existe una variable física cuya dinámica sigue una ecuación diferencial del tipo:

$$\delta x / \delta t = L(\lambda)x + h(x, \lambda), \quad (3)$$

donde λ es algún otro parámetro del sistema, h es una función no lineal¹¹ con respecto a las dos variables de las que depende, y L es lineal. En este tipo de ecuaciones, existe un valor de λ a partir del cual la dinámica puede seguir dos caminos distintos, una zona de inestabilidad como se muestra en la figura 1 donde la conducta a tomar puede ir por dos ramas distintas. Ejemplos de sistemas macroscópicos que sigan una conducta como ésta son las reacciones químicas de Belousov-Zhabotinski o ciertos procesos bioquímicos del ciclo vital de las «amebas» (ver Nicolis y Prigogine 1987).

(9) Cuando el sistema puede seguir su destino por dos caminos distintos se dice que hay una bifurcación. En Nicolis y Prigogine (1987) se puede ver, largamente desarrollado, la importancia de las bifurcaciones en relaciones con sistemas físicos o biológicos y su relación con la noción de complejidad.

(10) Disipativo es lo contrario de conservativo, es decir, que no conservan la energía mecánica, son irreversibles, etc. Por ejemplo los sistemas en que el rozamiento absorbe parte de energía para transformarse en calor.

(11) La linealidad de una función $f(x, \dots, x)$ se da cuando su representación gráfica es una recta para $n=1$, un plano para $n=2$, un espacio plano para $n=3$; &c.

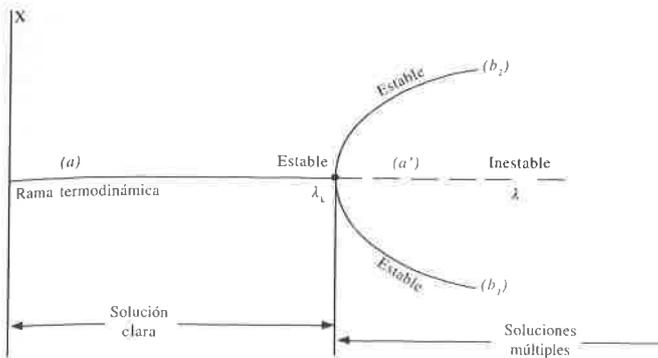


Figura 1: Diagrama de un espacio de estados con bifurcación. Se muestra la variación de la variable de estado x en función del parámetro de control l . Figura procedente de Nicolis y Prigogine (1987).

Los sistemas vivos poseen bifurcaciones, en cuanto a que son sistemas físicos lejanos del equilibrio, y ello origina que sean impredecibles. Esto le parece interesante a Prigogine y seguidores, y no sólo aplicable a cada ser humano individualmente sino también al colectivo de la humanidad:

Encontramos una expresión natural de la idea de que las sociedades funcionan como máquinas, refiriéndose a los períodos deterministas entre las inestabilidades, y la sociedad dominada por sucesos críticos (ejemplo: grandes hombres), que ocurren en los puntos de inestabilidad. Lejos de oponer azar y necesidad, vemos que ambos aspectos son esenciales en la descripción de sistemas no lineales lejos del equilibrio (en éste el sistema es la carrera de la humanidad). (Prigogine y Stengers 1979)

V. Argumento indeterminista en base a la asimetría temporal

El científico y filósofo de la ciencia de finales del s. XIX y principios del siglo XX Émile Meyerson señalaba que el determinismo implicaba la eliminación del tiempo. El tiempo es una ilusión subjetiva. De las mismas ecuaciones de Newton (1) se puede extraer una simetría temporal. Si cambiamos en las ecuaciones la variable t por $-t$, dado que la derivada segunda con respecto a t da el mismo resultado que la derivada segunda con respecto a $-t$, aquéllas permanecerán inalteradas. No hay distinción, desde el punto de vista de las leyes mecánicas clásicas, entre ir hacia adelante en el tiempo e ir hacia atrás. Este hecho está ligado entre otras cosas al determinismo —una causalidad numéricamente exacta entre el pasado y el futuro— y por el cual se hace posible determinar el pasado a partir del futuro del mismo modo que el futuro a partir del pasado. Todo destino está escrito en un solo tiempo t_0 : dado el pasado, presente o futuro se determinan los estados del sistema para cualquier otro tiempo. Incluso se podría decir que el paso del tiempo no existe, que sólo existe un Universo que es siempre el mismo. Una concepción que se asemeja a la de Parménides según la cual el mundo no cambia.

Sin embargo, nuestras percepciones denotan un paso del tiempo y que tiene una dirección: «la flecha del tiempo», y eso dio lugar a que muchos científicos y pensadores de la época se opusieran a la concepción parmenidiana. El filósofo y físico C. S. Peirce a finales del siglo XIX determinó que el progreso, la producción de heterogeneidad fuera

de la homogeneidad, nunca podía fluir de unas leyes mecánicas rígidas, demandaba la existencia de un azar objetivo por todo el Universo (Peirce 1892). Los errores no pueden ser eliminados por más que se refinen las medidas. Sus argumentos se basaron en que debe existir una flecha del tiempo, y menciona numerosas veces los trabajos de Maxwell. Para Peirce, todo en el Universo estaba sujeto a fluctuaciones espontáneas que eran reguladas y organizadas por principios de asociación análogos a los de la psicología. El Universo había evolucionado desde el puro caos a un orden creciente. Los errores, las fluctuaciones, provienen de una identidad con la conciencia. Más aún, la materia es parcialmente consciente. Para Peirce, las teorías de Darwin tienen carácter puramente estadístico. De este modo explica la flecha del tiempo, por un azar espontáneo fuera de las ecuaciones de la mecánica clásica. Necesita salirse la física conocida hasta el momento para salirse del determinismo con unas fluctuaciones de origen desconocido. Su posición pudo crear algunos adeptos pero dentro de la tradición menos positivista. William James, amigo de Peirce, compartía parte de sus opiniones y arguyó que actuar como si la libertad existiese era al menos intelectualmente respetable, dado que la ciencia no estaba en condición de refutar esta doctrina (James 1884). Se trata de una posición claramente anticientífica que delimita el saber de las ciencias más que una defensa del indeterminismo en el marco de las mismas.

En la actualidad, o en años recientes, tanto Popper (1956) como Prigogine (Prigogine y Stengers 1979, 1988; Prigogine 1997) se presentan como defensores de la flecha del tiempo y el indeterminismo en la física clásica. Es más, se basan en lo primero para demostrar lo segundo. Según éstos, una vez establecida la realidad del tiempo se ha eliminado el mayor obstáculo a la consecución de una mayor unidad entre las ciencias y las humanidades. Ya no tenemos por qué escoger entre una libertad práctica y un determinismo teórico.

Aparte del argumento de percepción de un tiempo psicológico, que cojea por basarse en percepciones subjetivas más que un análisis racional objetivo, se hace mención de la flecha del tiempo definida en el segundo principio de la termodinámica —formulado por Clausius en 1865— según el cual la entropía S del Universo, una medida del desorden, aumenta. Esto define una asimetría en el tiempo: la entropía crece hacia el futuro y decrece hacia el pasado. Explicado de forma ilustrativa con un ejemplo, tal principio nos dice que el calor fluye de los cuerpos calientes a los fríos o que se pueden mezclar dos fluidos con sólo ponerlos en contacto, pero no desmezclarlos. En estos dos ejemplos vemos como aparece una irreversibilidad: no se puede hacer que el calor pase de los cuerpos fríos a los calientes o que los fluidos mezclados se desmezclen.

VI. La respuesta está en la Estadística

En contra de la visión de Maxwell estaba la del creador de casi toda la física estadística clásica: Ludwig Boltzmann. Su opinión se recoge en estas palabras:

Una precondition de todo conocimiento científico es el principio de la completa determinación de todos los procesos naturales, o, tal como se aplica en la mecánica, la completa

determinación de todos los movimientos. Este principio declara que los movimientos de un cuerpo no ocurren accidentalmente, yendo algunas veces aquí, otras veces allí, sino que están completamente determinados por las circunstancias a las cuales el cuerpo está sujeto. (Boltzmann 1899, ed. 1905, págs. 276-277)

Permite la posibilidad de que todo puede calcularse por medio del movimiento de los átomos, y Dios no puede permitirse igualmente una creación u otra. Si el querer es inambiguo por algo *a priori* (tal como el movimiento de los átomos o Dios), entonces no habría voluntad. (Fasol-Boltzmann (ed.) 1990, pág. 283)

Boltzmann apoyó toda explicación mecánica en cualquier dominio. Llamó a la teoría de la evolución de Darwin mecánica y defendió que el pensamiento humano fuese mecánicamente necesario y sus conductas determinadas (Blackmore (ed.) 1995, vol. 2, 7.II; Boltzmann 1903).

Podemos explicar el concepto de belleza, lo mismo que el concepto de verdad, en términos mecánicos. (...) En la naturaleza y en el arte también domina la mecánica todopoderosa, al igual que sucede en la política y en la vida social. (Boltzmann 1903)

Para él, todo fenómeno probabilístico debería reducirse a determinismo mecánico. Precisamente esa idea que tenía de verlo todo como reducible a mecánica le hizo fundamentar la física estadística clásica por la que la termodinámica se reducía a mecánica clásica. Ante la objeción que se le puso de que colisiones elásticas en los sistemas mecánicos eran perfectamente reversibles y que el calor fluye irreversiblemente de los cuerpos calientes a los fríos, él derivó exitosamente los conceptos mecano-estadísticos que hoy en día se aplican, fuera de la mecánica cuántica, pudiendo conciliar ambos aspectos.

Boltzmann no fue, a pesar de sus teorías, un ejemplo de científico realista-positivista. No le gustaban las discusiones acerca de lo que es real o no, o de lo que existe o no. Él acepta un punto de vista más pragmático en su teoría de la verdad y altamente idealista (Blackmore (ed.) 1995, vol. 2, 2.VII; 4.VII). Boltzmann sostiene dos tesis epistemológicas (Videira 1992): que cualquier teoría física no es más que una representación de la naturaleza, y que hay diversas teorías, incluso opuestas, que pueden representarla; es lo que se conoce como «pluralismo teórico». La misma existencia de los átomos fue cuestionada por él aunque se piensa que en sus últimos años admitió la existencia de los mismos más allá de ser meros modelos (Blackmore (ed.) 1995, vol. 2, 9.I)¹². En cualquier caso, creyera o no en la realidad de los modelos de la física clásica, no cuestionaba que éstos llevaban al determinismo. El tema de la libertad para Boltzmann fue desviado en cierta medida de la cuestión del libre albedrío. Quería sostener el determinismo atómico y los procesos de una libre voluntad al mismo tiempo, aunque no encontró el modo de reconciliar los fenómenos mentales y físicos. Indagaba en una idea de libertad como sinónimo de potencia para realizar ciertas acciones ante ciertas situaciones políticas u otras, pero ello se desvía de nuestro tema.

(12) Las ideas filosóficas de Boltzmann tienen algo de contradictorio, por ejemplo en su peculiar mezcla de positivismo e idealismo. Su pensamiento y su vida topó con constantes tensiones. Algunas de las ideas que obsesionaron su vida fueron precisamente las de mecanicismo o su oposición al atomismo al que luego tuvo que ceder.

En cualquier caso, para lo que nos interesa aquí, fue un defensor del determinismo y no se dejó persuadir por la floreciente confusión entre probabilidad e indeterminismo. Las voliciones se guían entre conductas probables pero no son el producto ni el agente de un mero azar (Blackmore (ed.) 1995, vol. 2, 7.II).

I. Algunas ideas básicas de la mecánica estadística

La idea de que el calor se correspondía con una energía debida al movimiento de pequeñas componentes del sistema macroscópico fue propuesta primeramente por F. Bacon, J. Bernoulli y otros en los siglos XVII o XVIII, pero no sería hasta el siglo XIX en que la idea se formalizó y alcanzó una amplia aceptación hasta nuestros días (Sklar 1992). Dos pensadores británicos, J. Herepath y J. Waterston, sugirieron que los gases estaban compuestos de pequeñas partículas que chocaban en su movimiento con las demás partículas y las paredes del recipiente que las contenía y el calor era la energía cinética de esas partículas. Posteriormente Maxwell y Boltzmann derivarían la distribución estadística de las velocidades del gas en equilibrio mostrando cómo los gases en no-equilibrio tenderían a alcanzar el equilibrio.

La base de la mecánica estadística reside en la distinción entre macroestados y microestados: todo sistema físico es descrito en función de variables macroscópicas $A(t)$ —tales como la presión, temperatura, densidad,...— que se pueden expresar en función de los microestados, seis para cada una de las N partículas que compone el sistema, es decir, su posición r_i y velocidad v_i , en las tres direcciones del espacio. A toda magnitud macroscópica $A(t)$ se le asocia una microscópica que es función exacta de los microestados, $a(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t)$, relacionadas por:

$$A(t) = \int a(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t) P(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t) dr_1, \dots, dr_N dv_1, \dots, dv_N \quad (4)$$

es decir, la integración o suma continua a todas las combinaciones posibles de microestados multiplicados por la probabilidad $P(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t)$ de que se dé en el sistema cada una de las combinaciones particulares. Los cálculos estadísticos realizados por Maxwell y Boltzmann llevaron a que, en un sistema aislado y en equilibrio, todos los microestados son igualmente probables para una energía dada E , que se conserva por la ley de conservación de la energía deducible de la mecánica Newtoniana:

$$P(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t) \propto e^{-\frac{E(r_1, \dots, r_N; v_1, \dots, v_N, t)}{k_b T}} \quad (5)$$

con k_b una constante llamada «de Boltzmann», T la temperatura cinética del sistema, que en equilibrio coincide con la temperatura termodinámica. E , la energía total de las partículas, se corresponde a la suma de energías cinética y potencial de cada una de las partículas:

$$E = \sum_{i=1}^N [(1/2 m_i v_i^2) - \nabla_i F_i] \quad (6)$$

El equilibrio se corresponde con el estado más probable de un sistema. Resulta de ciertos cálculos, que no voy a especificar, que la probabilidad del sistema de estar fuera del valor más probable tiende a cero cuando el número de partículas N es suficientemente elevado.

Dado que $r_i(t)$ y $v_i(t) = (r_i)(t)$ están determinados $\forall i, \forall t$ entonces a y P estarán determinados y así también cual-

quier variable macroscópica $A(t)$ a través de (4). Por ejemplo, cuando A es la temperatura de un sistema en equilibrio¹³ vendrá dada por:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N m_i v_i^2}{3K_b N} \quad (7)$$

es decir, la temperatura es una medida de la velocidad de las partículas que componen un sistema.

La validez de la estadística clásica, en el marco de las ideas que Boltzmann propusiera, dentro de un determinismo como el que Laplace introdujera, conserva toda su vigencia actualmente (Bricmont 1996), a excepción de los campos donde los efectos derivados de la mecánica cuántica son notables. Ninguna nueva idea, relacionada quizás con la irreversibilidad o la flecha del tiempo o las bifurcaciones, ha dejado obsoleta la estadística clásica de siempre. Pretender negar las bases de una rama de la física hartamente comprobada por miles de experimentos y consistente con las teorías sobre la composición de la materia actuales (excepto por efectos cuánticos), es algo inaceptable.

2. Respuesta al argumento basado en las bifurcaciones

¿Qué representa una ecuación del tipo (3) en que aparece una bifurcación? Debemos pensar en lo que representa antes de resolverla y querer sacar conclusiones generales que afecten a la naturaleza y al ser humano en particular. La ecuación en cuestión representa algún sistema macroscópico existente, dando por tanto una descripción estadística de un sistema que está compuesto de un número muy elevado de partículas. La información macroscópica «termodinámica» siempre va a ser menor que la procedente del análisis del sistema microscópicamente, es decir, estudiando el movimiento de todas y cada una de las partículas microscópicas. Hablamos pues de unas variables, x y λ , que son el resultado de una relación del tipo (4); determinadas por las velocidades y posiciones de sus componentes. La información de la posición y la velocidad de las partículas constituye un conjunto de variables ocultas a nuestro conocimiento, su dinámica es determinista pero no poseemos su conocimiento.

La cuestión de si la ecuación del tipo (3) contiene elementos lineales y si tal es integrable o no son asuntos que despistan la atención del lector. Si la solución es compleja o no, resoluble analíticamente o por aproximaciones numéricas vuelve a ser, como dije repetidas veces, un problema de predictibilidad y no de determinismo. Pongamos que x tiene una dinámica extraña en la que bien puede seguir un camino u otro sin que se sepa por qué hace su elección, como se muestra en la figura 1. ¿Es lícito entonces proclamar un indeterminismo en la conducta de x porque no podemos conocer las determinaciones subyacentes que le llevan a una u otra conducta entre las dos posibles? La respuesta es no. Sí puede haber una causa que empuje a una rama de la bifurcación —y, de hecho la hay, si no nos salimos de la mecánica clásica— aunque sea imperceptible a nivel macroscópico, por ejemplo que haya un simple átomo más empujando hacia una solución estable que hacia la otra. Efectivamente, se trata de sistemas inestables vistos macroscópicamente que tanto pueden escoger un camino u otro

por pequeñas variaciones, pero esas variaciones pueden seguir, y de hecho siguen según (1), un determinismo estricto. En la mecánica cuántica las cosas son diferentes.

Así pues, la defensa de Prigogine, que —como dije— no constituye ningún nuevo hallazgo sino un desempolvamiento de cuestiones del siglo pasado, no es suficiente para derrocar el determinismo en la naturaleza quedando por tanto la negación libertad del hombre inalterada. *El fin de las certidumbres* (Prigogine 1996b), título de uno de sus últimos libros, no implica el fin de la necesidad. Su proclamación de la creatividad, la libertad,... repetidamente en todos y cada uno de sus libros no es suficiente para vencer el argumento laplaciano.

¿Qué responde Prigogine a estas acusaciones? Indudablemente, él conoce bien la mecánica estadística y sus implicaciones. ¿Por qué sigue pues insistiendo radicalmente en el indeterminismo? La respuesta que él da es (Sklar 1992, «The Problem of Initial Probability Distributions»): que un macroestado tiene microestados asociados, pero que no hay un microestado exacto asociado a cada componente del sistema regido deterministamente debajo de las variables macroscópicas. No hay parámetros conocidos que determinen el futuro del sistema, ni siquiera parámetros desconocidos. Los microestados, de tener algún significado físico, no se relacionan con las partículas de que está compuesta la materia y su movimiento. En los sistemas caóticos, según él, la descripción estadística es irreducible a unas variables microscópicas y la representación en forma de partículas siguiendo sus trayectorias debe ser reemplazada por una descripción puramente probabilística (Prigogine 1994, pág. 59). Las distribuciones de probabilidad de un estado no caracterizan físicamente un colectivo de muchas partículas, cada una de las cuales con un microestado. Niega por tanto las bases mismas de la mecánica estadística insinuando que la termodinámica no es reducible a física clásica. Piensa que las variables x y l de sus bifurcaciones son irreducibles como función de las posiciones y velocidades de las componentes. Niega las bases de una ciencia firmemente consolidada y cuyos resultados son corroborados en todas las áreas salvo donde entra la mecánica cuántica en juego. Niega que las cantidades termodinámicas dependan de lo que suceda en los componentes de la materia. Textualmente, afirma que el intento de Boltzmann explicando la irreversibilidad en base a leyes reversibles ha fallado (Prigogine 1994, pág. 41). Pero, si no se puede explicar un sistema en función de lo que ocurre en sus partes e interacciones —reduccionismo—, ¿qué elemento pretende introducir para explicar las variables termodinámicas? ¿Qué es, por ejemplo, la temperatura sino una medida de la agitación *determinista* de las partículas? ¿Cómo explica que las variables microscópicas de un sistema se comporten reversiblemente y que la irreversibilidad aparezca cuando decidimos concentrar nuestra atención en las variables macroscópicas? No hay respuesta, no tiene argumentos suficientes para refutar la reductibilidad, o bien su respuesta se limita a mencionar la bonita lista de palabras humanistas: libertad, creatividad,... que en ningún momento vienen avaladas por argumentos serios. Otra posibilidad es que trate de defender una posición no realista, en la que no existen las partículas microscópicas, difícilmente reconciliable con lo que las ciencias físicas conocen acerca de la materia actualmente. Sea como fuese, se abandonan las ciencias para saltar al campo de la especulación metafísica sin que haya ningún eslabón intermedio.

(13) Sólo está definida la temperatura termodinámica para sistemas en equilibrio.

La tesis de Prigogine y sus seguidores es extremadamente fuerte para los vagos argumentos a favor con que juega. Pretende derivar de la dinámica de sistemas caóticos que la noción de trayectoria debe ser abandonada y reemplazada por una teoría de probabilidades sobre el conjunto de trayectorias posibles, donde éstas no representen nuestra ignorancia de las variables microscópicas del sistema, sino que sean ellas mismas la realidad irreducible. La estadística clásica es plenamente consistente con las aparentes paradojas que plantea la irreversibilidad, no hay necesidad de un cambio de nociones. Este tipo de revolución conceptual ha sido de hecho implantada, pero en el marco de la mecánica cuántica. Sin embargo, como hace notar Batterman (1991), en la mecánica cuántica, la exclusión de las variables ocultas está soportada por una argumentación teórica y experimental firme, mientras que en la propuesta de Prigogine sólo figura una creencia sin argumento racional que demuestre que las conjeturas de Boltzmann estaban equivocadas a este respecto.

Como ejemplo de este tema, consideremos el lanzamiento de una moneda al aire en que conocemos «exactamente» las condiciones iniciales, y planteemos la cuestión de si está determinado «exactamente» el que caiga al suelo dando cara o cruz. La respuesta es que sí está determinado pero nosotros no lo podemos predecir. Éste es un caso de caos determinista, tal y como explicaba en la sección 2.1. Si conocemos las condiciones iniciales de forma aproximada, aunque la imprecisión sea muy pequeña pero no nula, resultará que no nos será posible conocer si sale cara o cruz, habrá un 50% de posibilidades para cada una. Este resultado ha sido demostrado por el físico Poincaré a finales del siglo pasado. No se puede predecir cómo caerá la moneda, pero la moneda está determinada a caer de algún modo. Cuando el caos involucra dos posibles soluciones distintas, a las que cualquier pequeño error en el conocimiento o cálculo de las condiciones iniciales puede dar una o la otra solución, estamos en un caso de bifurcación.

Queda claro que las bifurcaciones corresponden a sistemas caóticos, que como vimos en la sección 2.1 son no predecibles pero sí deterministas dentro de la mecánica clásica. Entonces, la base de toda defensa del indeterminismo basada en las bifurcaciones sólo puede encontrarse en la varias veces mencionada confusión de determinismo y predictibilidad o la inclusión de indeterminismo en las propias leyes microscópicas de las partículas que componen un sistema.

3. Respuesta al argumento basado en la flecha del tiempo

Volviendo a la cuestión de la flecha del tiempo y al ejemplo en que dos fluidos diferentes se mezclarán con el paso del tiempo hacia el futuro y no viceversa, podemos clarificar y conciliar el suceso termodinámico con la reversibilidad presente en las ecuaciones de Newton a través de la mecánica estadística. En tal ejemplo, los dos fluidos son compuestos de partículas diferentes, digamos de tipo A y B. Cuando los fluidos están separados en dos recipientes, 1 y 2, y se abre una ranura que comunica ambos, tendremos que hay una probabilidad muy alta de que pasen partículas de un recipiente al otro. Partículas A pasarán de 1 a 2 y partículas B pasarán de 2 a 1 (ver figura 2). Y esto ocurrirá hasta que esté igualada la densidad de partículas A y B en ambos recipientes, es decir, cuando se alcance el equilibrio: cuando pasen tantas partículas A de 1 a 2 como de 2

a 1 y lo mismo con las partículas B. Sin embargo, supongamos la situación contraria, tenemos el fluido mezclado en ambos recipientes comunicados y queremos recuperar los fluidos separados. Para ello, todas las partículas B contenidas en 1 deben ir al recipiente 2, y todas las partículas A contenidas en 2 deben ir al recipiente 1. ¿Es ello posible desde el punto de vista de una visión microscópica del sistema? Sí, sí lo es. No hay ninguna ley física que prohíba a las partículas separarse. El hecho de que no veamos en la vida real que esto ocurra no implica su imposibilidad sino más bien su *improbabilidad*. Es decir, tiene una probabilidad muy baja, extremadamente baja, pero no exactamente nula como para que sea imposible por ley natural. Debemos recordar los principios básicos de la estadística, que ya Laplace hacía explícitos: «*las combinaciones regulares suceden más raramente únicamente porque son menos numerosas*» (Laplace 1814, «Principios generales del cálculo de probabilidades»).

Si el azar es imparcial, cuando el número de partículas es muy alto, debe haber un flujo de 1 a 2 del promedio de la substancia contenida en 1 y lo mismo de 2 a 1. Esto implica también que el crecimiento de la entropía es una ley estadística, que se hace exacta cuando $N \rightarrow \infty$ como sucede en todas las leyes estadísticas, y que puede poseer fluctuaciones notables cuando el número de partículas es pequeño. Por ejemplo, si los fluidos A y B fuesen cada uno un gas de dos partículas, habría una probabilidad de $(1/2)^4 = 6.25\%$ de encontrar en un determinado instante los fluidos separados respectivamente en los recipientes 1 y 2. Esto quiere decir que de un millón de veces que observemos el sistema habrá unas 62 o 63 mil ocasiones en que los gases están separados. Si fuesen 4 partículas de cada tipo, la probabilidad $(1/2)^8 = 0.39\%$; y así se calculan las probabilidades para cualquier número N como

$$P(N) = (1/2)^{2N}$$

cuando hay N partículas de cada tipo, la cual disminuye con el número de partículas rápidamente pero nunca se hace nula.

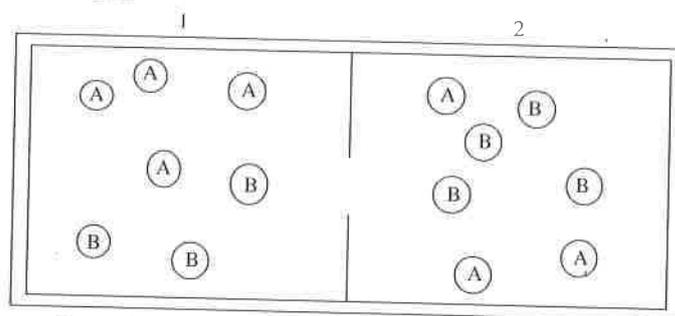


Figura 2: Dos recipientes, 1 y 2, conectados, que contienen dos tipos de fluidos A y B.

No hay irreversibilidad en el sentido de imposibilidad, la única causa por la que vemos que algunos fenómenos indican una *flecha del tiempo* y no vemos por ejemplo fluir el calor de lugares fríos a calientes es porque es muchísimo menos probable, aunque no imposible. La segunda ley de la termodinámica, que así se llama técnicamente el ejemplo mencionado, se explica con los movimientos deterministas de los átomos que sustentan el sistema físico en cuestión y para nada implica una contradicción. Es decir, no puede

servir la flecha del tiempo termodinámica para refutar el determinismo. El tiempo es irreversible en los sistemas inestables porque el comportamiento de los sistemas en una inversión de la flecha del tiempo es caótico: se necesitan unas condiciones muy restringidas y de baja probabilidad para que sea posible recuperar un estado pasado en un proceso irreversible, y pequeñas variaciones en esas condiciones nos alejan de la posibilidad de reversibilidad. Dado que el espacio es un continuo, la cantidad de microestados posibles en una configuración de partículas tiende a infinito, y sólo unos pocos relativamente son adecuados en las condiciones iniciales para poder recuperar el estado pasado de un sistema en una inversión temporal cuando nos encontramos fuera del equilibrio.

Es perfectamente posible explicar los fenómenos irreversibles dentro de las leyes fundamentales de la mecánica clásica. Esto fue hecho por Boltzmann hace más de un siglo y sus argumentos se mantienen:

Dado que en las ecuaciones diferenciales de la mecánica no existe nada análogo al segundo principio de la termodinámica, este último no puede representarse mecánicamente nada más que por medio de suposiciones que atiendan a las condiciones iniciales. (Boltzmann 1904)

Las condiciones iniciales de un sistema, es decir, las posiciones y velocidades de cada una de sus partículas, contienen la información acerca de la evolución del sistema en un sentido o en otro, no las propias ecuaciones diferenciales que, como bien sabemos, son simétricas respecto al tiempo¹⁴.

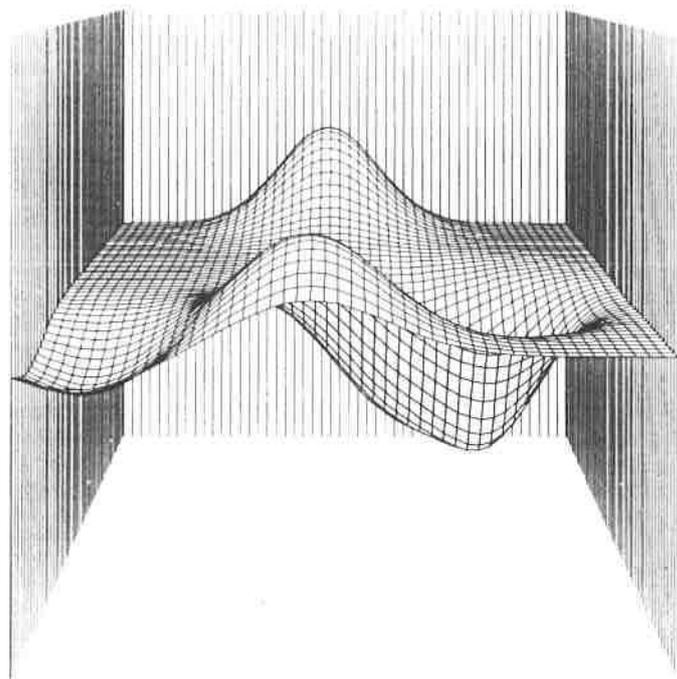
Nuevamente, estoy exponiendo unas ideas muy básicas de la mecánica estadística que son bien conocidas por todos los que han pensado algo estos temas y que seguro Prigogine conoce sobradamente. Nadie discute que los sistemas aislados en no-equilibrio tiendan hacia el equilibrio y no viceversa. Prigogine sigue insistiendo, no obstante, en que esta flecha del tiempo implica indeterminismo porque descarta las fluctuaciones de la entropía, postula que la reversibilidad es absolutamente imposible más que improbable. Su idea es que los estados físicos evolucionan del no-equilibrio al equilibrio, y los primeros son estados singulares que tienen toda la probabilidad concentrada en un espacio multiparamétrico de medida cero mientras que los estados de equilibrio pueden ser no singulares¹⁵. En el momento que uno se sale de este estado de no-equilibrio, deja de estar en el estado singular y no es probable que vuelva a él por su medida nula en el espacio de parámetros que da probabilidad nula para su retorno.

Como señala Sklar (1992, «The problem of Initial Probability Distributions»), estos estados singulares son innecesarios y representan mal las situaciones físicas reales de in-

(14) Surge el problema de saber por qué recordamos el pasado y no el futuro, que nos lleva a ver la causación del pasado al futuro. Una explicación nos dice que hay muchos eventos futuros que dependen de uno pasado pero pocos en el pasado que requieran un determinado futuro (Horwich 1987), relacionado con el aumento de la entropía. En cualquier caso, queda bien claro que la causalidad determinista no tiene en absoluto necesidad de romperse.

(15) Por definición, un estado singular es aquel que sólo toma valor no nulo, en este caso de probabilidad no nula, en un único estado discreto de medida cero.

terés. Y Sklar acompaña la crítica con el contraejemplo que especificaba antes de los dos recipientes con dos fluidos, el estado inicial de no-equilibrio (cuando ambos fluidos están separados) no es un estado de medida cero. Todas las combinaciones posibles de posiciones de las partículas en una parte del volumen que dan el mismo macroestado de tener todas las partículas en una parte no suman una probabilidad nula ($P(N) \neq 0$). La contradicción misma aparecería cuando hacemos los cálculos de probabilidad para N partículas de cada tipo. Para pocas partículas la probabilidad no es despreciable, como indiqué en (8). Si suponemos que existe un N a partir del cual la probabilidad total se hace de medida nula ($P(N)=0$) y que no es nula para números menores o iguales que $N-1$ ($P(N-1) > 0$), ¿cómo se puede justificar que por añadir una partícula más de cada tipo al sistema se haga totalmente imposible la separabilidad de los fluidos? Ello sólo puede ser si la probabilidad de que ese último par de partículas de ocupar los recipientes que le correspondan sea nula ($P(N)/P(N-1)=0$), lo cual es falso (según (8), $P(N)/P(N-1)=0.25$). ¿Qué tiene este par de partículas de especial para que esté prohibida estrictamente su ocupación en los recipientes correspondientes?



En resumen, Boltzmann explicó hace más de un siglo la irreversibilidad, la flecha del tiempo y el crecimiento de la entropía como características de sistemas deterministas que siguen las leyes de Newton. Prigogine prescinde de estas explicaciones y apuesta por una incertidumbre proveniente de la ignorancia. Isabelle Stengers, coautora de muchos de los libros de divulgación de Prigogine (Prigogine y Stengers 1979, 1984, 1988), afirma que «la reducción de la entropía termodinámica a una interpretación dinámica es difícil de ver si no es como una proclamación ideológica...» (Stengers 1993, pág. 192), pero lo cierto es que sucede, en mi opinión, justamente lo contrario: las ideas de Boltzmann son ciencia, mientras que las de Prigogine o Stengers son «ideología» basada en creencias no científicas.

VII. Conclusiones

Las conclusiones que quiero destacar de este artículo son, brevemente:

La física clásica constituye una descripción de un mundo determinista tal y como Laplace concluyera a principios del siglo XIX, y tal como aparece implícito en las ecuaciones de Newton.

Popper y Prigogine confunden frecuentemente la cuestión del determinismo con la de la predictibilidad.

Si en algún momento Popper o Prigogine se refieren al determinismo no confundido con la predictibilidad, su discurso para negar que el mundo de la física clásica sea determinista consiste en decir que el mundo no se puede explicar en términos de física clásica, lo cual es harto inapropiado.

Boltzmann dio solución hace más de un siglo a los problemas de compatibilidad de la termodinámica con la física clásica.

Prigogine no reconoce las soluciones de la mecánica estadística y sus aserciones se basan en creencias no justificadas científicamente.

Bibliografía

- R. W. Batterman, «Randomness and probability in dynamical theories: on the proposals of the Prigogine school», *Phil. of Sci.*, 58, 241, 1991.
- J. Baudrillard, *L'Illusion de la Fin*, Galilée, París 1992.
- A. E. Bell A, *Newtonian science*, Edward Arnold, London 1961.
- J. Blackmore, ed., *Ludwig Boltzmann. His later life and philosophy, 1900-1906*, Kluwer, Dordrecht 1995.
- D. Bohm, *Wholeness and the implicate order*, Routledge & Kegan Paul, London-Boston. Traducido al español en: 1988, *La totalidad y el orden implicado*, Kairós, Barcelona 1981.
- L. Boltzmann, «Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik», en: 1905, *Populäre Schriften*, Barth, Leipzig 1899.
- L. Boltzmann, *Über die Principien der Mechanik: Zwei akademische Antrittsreden*, S. Hirzel, Leipzig. Traducido al español en: 1986, «Sobre los principios de la mecánica», en: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Alianza, Madrid 1903.
- Conferencia, en: 1905, *Populäre Schriften*, Barth, Leipzig, ensayo 19. Traducido al español en: 1986, «Sobre la mecánica estadística», en: *Escritos de mecánica y termodinámica*, Alianza, Madrid 1904.
- J. Bricmont, «Science of Chaos or Chaos in Science?», *Physica Magazine*, 17, págs. 159-208. Reproducido en: 1996, *The flight from Science and Reason*, Gross P. R., Levitt N., Lewis M. W., eds., *Annals of the New York Academy of Sciences*, 775, 1996, págs. 131-175.
- P. Casini P., *L'Universo-macchina*, Laterza, Bari (Italia). Traducido al español en: 1971, *El Universo máquina*, Martínez Roca, Barcelona 1969.
- G. Deleuze y F. Guattari, *Qu'est-ce que la philosophie?*, Ed. de Minuit, París 1991.
- A. Escotado, *Caos y Orden*, Espasa Calpe, Madrid 1999.
- L. M. Fasol-Boltzmann, ed., *Ludwig Boltzmann Principen der Naturphilosophie*, Springer-Verlag, Berlín 1990.
- A. Fernández Rañada, «Determinismo y caos en las leyes físicas», en: *Actas del I Congreso de teoría y metodología de las ciencias*, Oviedo 1982.
- F. Guattari, *Chaosmose*, Galilée, París 1992.
- G. Harkness, *John Calvin, The Man and His Ethics*, H. Holt & Co., New York 1931.
- R. Harre, «Pierre Simon De Laplace», en: *The Encyclopedia of Philosophy*, Edwards P., ed., vol. 4, 391, MacMillan and the Free Press, New York-London 1972.
- P. Horwich, *Asymmetries in Time*, MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1987.
- D. Hume, *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Reproducido en: 1975, Collier Books, Nueva York. Traducido al español en: 1994, *Investigación sobre el conocimiento humano*, Alianza, Madrid 1748.
- W. James, «The Dilemma of Determinism», en: 1915, *The Will to Believe and Other Essays in Popular Philosophy*, New York 1884, pág. 145.
- R. V. Jensen, «Chaos», en: Meyers R. A., ed., *Encyclopedia of modern physics*, Academic Press, San Diego (California) 1990, págs. 69-96.
- I. Kant, *Kritik der praktischen Vernunft*, Riga. Traducido al español en: 1994, *Crítica de la razón práctica*, Sígueme, Salamanca 1788.
- P. S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*. Traducido al español en: 1985, *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, Alianza, Madrid 1814.
- J. F. Lyotard, *La condition postmoderne: Rapport sur le savoir*, Minuit, Paris. Traducido al español en: 1993, *La condición postmoderna*, Planeta de Agostini, Barcelona 1979.
- D. M. MacKay, *Freedom of Action in a Mechanistic Universe*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1967.
- J. C. Maxwell, Reproducido en: 1952, *Matter and Motion*, Dover, Nueva York.
- I. Newton, *Principia*. Traducido al español en: 1987, *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Alianza, Madrid 1687.
- G. Nicolis y I. Prigogine, *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*, R. Piper GmbH & Co. KG, München. Traducido al español en: 1994, *La estructura de lo complejo*, Alianza, Madrid 1987.
- W. D., ed., *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge 1890.
- C. S. Peirce, *Papers*. Reproducido en: Hartshorne Ch., Weiss P., eds., 1960, *Collected papers*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge (Mass.) 1892.
- R. Penrose, *The Emperor's New Mind. Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*, Oxford University Press, Oxford. Reproducido en: 1990, *Vintage*, Londres. Traducido al español en: 1991, *La nueva mente del emperador*, Mondadori, Madrid 1989.
- H. Poincaré, *Science et Méthode*, Flammarion, París 1909.
- K. R. Popper, *The Open Universe. An argument to indeterminism. From the Postscript to the Logic of Scientific Discovery*. Traducido al español en: 1994, *El Universo abierto. Un argumento en favor del indeterminismo. Postscriptum a La Lógica de la investigación científica. Vol. II*, Tecnos, Madrid 1956.
- I. Prigogine, «Enfrentándose con lo irracional», en: Wagensberg J., ed., *Proceso al azar*, Tusquets, Barcelona 1986, pág. 155.
- Les Lois du Chaos*, Flammarion, París 1994.
- Entrevista a: 1996a, «Ilya Prigogine: El sentido del Universo son el tiempo y la creatividad», *El Mercurio*, 16-6-1996, E1, E8, E9, Santiago de Chile.
- 1996b, *La fin des certitudes*, Jacob Odile, Paris. Traducido al español en: 1997, *El fin de las certidumbres*, Taurus, Madrid.
- I. Prigogine y I. Stengers, *La nouvelle alliance - Métamorphose de la science*, Gallimard. Traducido al español en: 1983, *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Alianza, Madrid 1979.
- Order Out of Chaos*, Bantam Books, New York 1984.
- Entre le temps et l'éternité*, Librairie Arthème, Fayard. Traducido al español en: 1990, *Entre el tiempo y la eternidad*, Alianza, Madrid 1988.
- R. Rucker, *Infinity and the Mind*, Bantam Books, Nueva York 1983.
- A. Schopenhauer, *Die beiden Grundprobleme der Ethik*. Traducido al español en: 1993, *Los dos problemas fundamentales de la ética*, Siglo veintiuno, Madrid 1841.
- M. Serres, *Eclaircissements: Cinq Entretiens avec Bruno Latour*, Fr. Bourin, París 1992.
- L. Sklar, «The introduction of Probability into Physics», en: *Philosophy of Physics*, Oxford University Press, Oxford 1992, cap. 3.
- A. D. Sokal y J. Bricmont, *Impostures intellectuelles*, Odile Jacob, París. Traducido al español en: 1999, *Imposturas intelectuales*, Paidós, Barcelona 1997.
- I. Stengers, *L'Invention des Sciences Modernes*, La Découverte, París 1993.
- A. A. P. Videira, *Atomisme Epistémologique et Pluralisme Théorique dans la Pensée de Boltzmann*, tesis doctoral, Equipe Rehseis (CNRS), Universidad de París VII 1992.
- J. Wagensberg, ed., *Proceso al azar*, Tusquets, Barcelona 1986.
- D. Wiggins, «Freedom, knowledge, belief and causality», en: *Knowledge and Necessity*, Royal Institute of Philosophical Lectures 1968-1969, Cambridge 1970.